

УДК 616.12-007.2-053.3-089.86]: 519.283: 004

DOI: 10.17816/pmj39174-84

## **ПЕРСПЕКТИВЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ МЕЖСИСТЕМНОГО ШУНТИРОВАНИЯ ПРИ ВРОЖДЕННЫХ ПОРОКАХ СЕРДЦА У ДЕТЕЙ**

**Ю.С. Синельников<sup>1\*</sup>, В.Б. Арутюнян<sup>1</sup>, А.А. Породииков<sup>1</sup>, А.Н. Биянов<sup>2</sup>, Н.С. Поспелова<sup>2</sup>,  
А.Г. Кучумов<sup>3,4</sup>, В.С. Туктамышев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Федеральный центр сердечно-сосудистой хирургии имени С.Г. Суханова, г. Пермь,

<sup>2</sup>Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера,

<sup>3</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

<sup>4</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия

## **PROSPECTS OF MATHEMATICAL MODELLING FOR OPTIMIZATION OF INTERSYSTEM BYPASS GRAFTING IN CONGENITAL HEART DISEASES AMONG CHILDREN**

**Yu.S. Sinelnikov<sup>1\*</sup>, V.B. Arutyunyan<sup>1</sup>, A.A. Porodikov<sup>1</sup>, A.N. Biyanov<sup>2</sup>, N.S. Pospelova<sup>2</sup>,  
A.G. Kuchumov<sup>3,4</sup>, V.S. Tuktamyshev<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>S.G. Sukhanov Federal Center for Cardiovascular Surgery, Perm,

<sup>2</sup>E.A. Vagner Perm State Medical University,

<sup>3</sup>Perm National Research Polytechnic University,

<sup>4</sup>Kazan Federal University, Russian Federation

---

© Синельников Ю.С., Арутюнян В.Б., Породииков А.А., Биянов А.Н., Поспелова Н.С., Кучумов А.Г., Туктамышев В.С., 2022  
тел.+7 342 239 87 33  
e-mail: ysinelnikov@mail.ru

[Синельников Ю.С. (\*контактное лицо) – доктор медицинских наук, сердечно-сосудистый хирург, главный врач, ORCID: 0000-0002-8294-662X; Арутюнян В.Б. – доктор медицинских наук, сердечно-сосудистый хирург, заведующий кардиохирургическим отделением, ORCID: 0000-0002-1730-9050; Породииков Артем Александрович – сердечно-сосудистый хирург, ORCID: 0000-0003-3624-3226; Биянов А.Н. – кандидат медицинских наук, доцент кафедры педиатрии с курсом поликлинической педиатрии, ORCID: 0000-0002-9314-3558; Поспелова Н.С. – кандидат медицинских наук, доцент кафедры детских инфекционных болезней, ORCID: 0000-0003-0075-0226; Кучумов А.Г. – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики; научный сотрудник, ORCID: 0000-0002-0466-175X; Туктамышев В.С. – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной математики, механики и биомеханики, ORCID: 0000-0002-3994-038].

© Sinelnikov Yu.S., Arutyunyan V.B., Porodikov A.A., Biyanov A.N., Pospelova N.S., Kuchumov A.G., Tuktamyshev V.S., 2022  
tel.+7 342 239 87 33  
e-mail: ysinelnikov@mail.ru

[Sinelnikov Yu.S. (\*contact person) – MD, PhD, cardiovascular surgeon, Chief Physician, ORCID: 0000-0002-8294-662X; Arutyunyan V.B. – MD, PhD, cardiovascular surgeon, Head of Cardiac Surgery Unit, ORCID: 0000-0002-1730-9050; Porodikov A.A. – cardiovascular surgeon, ORCID: 0000-0003-3624-3226; Biyanov A.N. – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Department of Pediatrics with Course of Polyclinic Pediatrics, ORCID: 0000-0002-9314-3558; Pospelova N.S. – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Department of Children's Infectious Diseases, ORCID: 0000-0003-0075-0226; Kuchumov A.G. – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Calculus Mathematics and Biomechanics, ORCID: 0000-0002-0466-175X; Tuktamyshev V.S. – Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Calculus Mathematics and Biomechanics, ORCID: 0000-0002-3994-038].

**Цель.** Проведен анализ факторов риска развития осложнений у 35 новорожденных и детей первого года жизни при проведении процедуры модифицированного шунтирования Блэлока – Тауссига (МБТШ). Изучены возможности математического моделирования системы «аорта – шунт – легочная артерия» для оценки эффективности функционирования шунта.

**Материалы и методы.** Исследование проводилось с 2016 по 2021 г. Медиана возраста на момент операции составила 10 (3,5–30) дней (от 1 до 180), медиана массы тела – 3,0 (2,8–3,54) кг. Медиана размера шунта составляла 3,5 мм (3,5–3,5), а медиана размера шунта на 1 кг массы тела – 1,11 (1,0–1,21) мм/кг. Увеличение размера шунта потребовалось 4 (11,4 %) пациентам из 35. В сотрудничестве с Пермским политехническим университетом в рамках программы оценки гидродинамического моделирования для оценки кровотока через МБТШ данные 4 пациентов были обработаны математически.

**Результаты.** Три (9 %) пациента из 35 умерли через 3 (2,5–11,0) дня из-за кардиореспираторной декомпенсации. Единственным прогностически неблагоприятным фактором риска смертности стали большие величины отношения – размер шунта к массе тела ( $p = 0,023$ ). По данным математического моделирования было установлено, что поток крови по легочным артериям во всех анализируемых типах шунтов был не симметричен.

**Выводы.** Процедура МБТШ продолжает оставаться процедурой высокого риска, что связано со значительной заболеваемостью и смертностью в раннем послеоперационном периоде. Математическое моделирование системы «аорта – шунт – легочная артерия» перед операцией позволит выбрать оптимальный диаметр шунта и место его имплантации и станет одним из этапов к персонализированной хирургии врожденных пороков сердца в будущем.

**Ключевые слова.** Кровь, детская кардиология, МБТШ, моделирование, биомеханика, атрезия легочной артерии.

**Objective.** To study the facilities of mathematical modelling of the system aorta-shunt-pulmonary artery for assessing the efficiency of shunt functioning.

**Materials and methods.** The risk factors for the development of complications in 35 newborns and infants of the first year of life were analyzed while carrying out the procedure of the modified Blalock-Taussig shunt (MBTShunt). The study lasted from 2016 to 2021. The age median at the time of operation was 10 (Q1–Q3: 3,5–30) days (from 1 to 180), the body mass median – 3,0 (Q1–Q3: 2,8–3,54) kg. The shunt size median was 3,5 mm (Q1–Q3: 3,5–3,5), and the median of shunt size per 1 kg of body mass – 1,11 (Q1–Q3: 1,0–1,21) mm/kg.

The shunt size was increased for 4 out of 35 (11.4%) patients. As a result of cooperation with Perm Polytechnic University, in the frameworks of the program of hydrodynamic modelling evaluation, the data from 4 patients were processed mathematically to assess blood flowing through the MBTShunt.

**Results.** Three (9 %) out of thirty five patients died in 3 (Q1–Q3: 2,5–11,0) (min–max 2–19) days because of cardiorespiratory decompensation. The only prognostically unfavorable risk factor for death was a large value of shunt size to body mass ratio ( $p=0.023$ ). It was stated according to mathematical modelling data that the blood flow through the pulmonary arteries in all the analyzed types of shunts was not symmetric. An increase in the diameter of a shunt permits to improve a symmetry of blood flow through the left and right branches of the pulmonary artery.

**Conclusions.** The procedure of MBTShunt remains the procedure of high risk that is associated with a significant sickness rate and death rate in the early postoperative period. Mathematical modelling of the system aorta-shunt-pulmonary artery prior to the operation makes it possible to choose an optimal diameter of shunt and place of its implantation and will become one of the stages to personified surgery of congenital heart diseases in the future.

**Keywords.** Blood, pediatric cardiology, modelling, biomechanics, pulmonary artery atresia.

## ВВЕДЕНИЕ

Прорывным решением в хирургическом лечении цианотических врожденных пороков сердца (ВПС), таких как тетрада

Фалло, атрезия клапана легочной артерии, стало создание межсистемного шунта [1–3]. В 1945 г. кардиохирург Блэлок и кардиолог Тауссиг предложили выполнить анастомоз между подключичной и легочной артерия-

ми у ребенка с тетрадой Фалло [4]. В 1975 г. Де Леваль модифицировал технику, используя политетрафторэтиленовый шунт, который широко известен как модифицированный шунт Блэлока – Тауссига [5], ставший стандартной промежуточной паллиативной операцией при цианотических пороках сердца для обеспечения легочного кровотока. Анастомоз должен обеспечить достаточный, но не избыточный легочный кровоток без снижения сердечного выброса, повреждения легочных сосудов и объемной перегрузки желудочка, а также способствовать равномерному росту легочных артерий. Важно отметить, что установка модифицированного шунта Блэлока – Тауссига является процедурой высокого риска с общей смертностью от 2,3 до 16,0 % [6–8]. Одна треть смертей приходится на первые сутки после операции, две трети – первые 30 дней. Такой уровень смертности конкурирует с риском смертности многих операций неонатального периода на открытом сердце с искусственным кровообращением. По данным Европейской ассоциации сердечно-сосудистых хирургов (англ. European Society for Vascular Surgery) за 2010 г., проведение операции с применением модифицированного шунта Блэлока – Тауссига имело существенно больший риск, чем артериальное переключение с закрытием дефекта межжелудочковой перегородки (смертность 6,9 %), и немного более безопасно, чем восстановление перерыва дуги аорты (смертность 8,1 %) [8–10].

В данном исследовании представлены собственные данные по результатам раннего послеоперационного периода после операции МБТ-шунтирования. Для анализа гемодинамических показателей и выбора оптимальных характеристик шунта с помощью математического моделирования была построена индивидуальная биомеханическая модель системы «аорта – шунт – легочная артерия».

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведен анализ 35 процедур МБТШ, выполненных новорожденным и детям грудного возраста в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Федеральный центр сердечно-сосудистой хирургии имени С.Г. Суханова» Минздрава РФ с 2016 по 2021 г. МБТШ, выполненное у пациентов с синдромом гипоплазии левых отделов сердца или в рамках других сложных процедур, таких как унифокализация, было исключено. Двадцать шесть пациентов были новорожденными, 10 – младенцами. Двадцать три (66 %) пациента мужского пола и 12 (34 %) – женского. Демографические данные приведены в табл. 1. Диагноз был установлен с помощью трансторакальной эхокардиографии.

Т а б л и ц а 1

### Предоперационные клинические характеристики

Переменная	Медиана (диапазон)
Возраст, дни	10 (3,5–30)
Масса при операции	3,0 (2,8–3,54)
Длина тела, см	50 (45,5–52,5)
Сатурация, %	78 (71–81,5)
Вид порока	N (%)
Тетрада Фалло, абс. (%)	4 (11)
Двойное отхождение сосудов от правого желудочка, абс. (%)	5 (14)
Лёгочная атрезия 1 типа с дефектом межжелудочковой перегородки, абс. (%)	17 (49)
Лёгочная атрезия 2 типа с дефектом межжелудочковой перегородки, абс. (%)	2 (6)
Единый желудочек, включая легочную атрезию и дефект желудочковой перегородки, абс. (%)	7 (20)

**Хирургическая техника.** Все операции выполнялись через срединную стерно-

томию. После стернотомии удалялась правая доля тимуса, выделялся брахиоцефальный ствол до бифуркации и правая подключичная артерия в одном случае – для проксимального анастомоза. Выделялась правая легочная артерия до деления на сегментарные ветви. В случае центральных анастомозов выделялась и левая легочная артерия. При операциях off-рamp перед зажимом Сатинского вводился гепарин в объеме 100 МЕ/кг. Затем зажимом Сатинского пережимался брахиоцефальный ствол/подключичная артерия, в случае центральных анастомозов зажим накладывался на восходящую аорту. По нижней поверхности брахиоцефального ствола/подключичной артерии проводилась аортотомия. Затем формировался проксимальный анастомоз с косо срезанным сосудистым протезом Gore-Tex (W.L. Gore & Associates, Inc., AZ, USA). Зажим снимался, проверялся кровоток по шунту, затем клипировался большой клипсой (использовался лигоклип). Затем измерялась длина шунта до правой легочной артерии. Отсечение проводилось, учитывая некоторую податливость (растяжимость) протеза в сторону меньшей длины, поперечно. Дистальный конец шунта промывался для удаления крови из просвета. Затем проводились боковое отжатие правой легочной артерии зажимом Сатинского. Артериотомия и формирование дистального анастомоза. В случае центральных анастомозов первоначально формировался дистальный анастомоз со стволом легочной артерии, затем проксимальный анастомоз с восходящей аортой по типу «U»-графта. После зажима Сатинского на восходящей аорте и аортотомии использовались выкусыватели 3 и 3,5 мм соответственно. Во всех случаях применялась нить пролен 7, игла 9,3. Все швы проклеивались клеем гистокрил.

Тактика в отношении открытого артериального протока (ОАП) зависела от массы тела пациента. Детям, чей вес был менее 3 кг,

ОАП оставляли открытым, применяли препараты простагландины, которые вводились пациенту с момента установки диагноза дуктус-зависимого порока. После стабилизации пациента на 1–2-е сутки принималось решение об отмене простагландинов, и ОАП, как правило, закрывался к 4–5-м суткам послеоперационного течения без отрицательных последствий для гемодинамики. Детям же, чей вес составлял 3,5 кг и выше, вне зависимости от операционной техники формирования анастомоза, открытый артериальный проток лигировали.

Основная стратегия была направлена на скорейшее закрытие грудной клетки. Но в тех случаях, когда интраоперационно наблюдались большие объемы сердца, для предотвращения симптома тесной грудной клетки либо нарушения ритма по типу фибрилляции желудочков, потребовавшей дефибрилляции, а также в случае замены шунта на графт другого диаметра, пациента оставляли с хирургическим диастазом грудины.

Первоначальная антикоагуляция после МБТШ – это внутривенное введение гепарина со скоростью 10 (10–15,5) ед./кг в час от начала операции и в дальнейшем после операции до восстановления энтерального питания, когда гепарин отменялся и назначался аспирин в дозе 8–10 мг/кг/сут. Уровень гепарина титровался для терапевтических уровней анализа гепарина в зависимости от значений АПТВ – 60–90 с.

Статистический анализ проводился с использованием IBM SPSS Statistics 19 (SPSS, Inc., США). Категориальные переменные представлены в виде чисел с процентами и сравнивались с использованием точного теста Фишера. Непрерывные переменные представлены в виде медианы с квартилями, представленными в виде  $Me (Q1-Q3)$ , и сравнивались между группами с использованием теста Манна – Уитни. Значения  $p < 0,05$  считались значимыми.

В сотрудничестве с Пермским политехническим университетом в рамках программы оценки гидродинамического моделирования для оценки кровотока через МБТШ данные четырех пациентов были обработаны математически. Используя МСКТ-ангиокардиографию четырех пациентов в раннем послеоперационном периоде, была построена индивидуальная биомеханическая модель системы «аорта – шунт – легочная артерия» для анализа гемодинамики в данной области. В трёх случаях шунт разного диаметра (3,5 и 4 мм) выполнялся между БЦА и правой ЛА. В одном случае осуществлялось формирование центрального шунта между восходящей аортой и бифуркацией ЛА. Был получен набор геометрических образов у четырех пациентов для последующего импорта в конечно-элементный решатель ANSYS Workbench (ANSYS inc, Cannonburg, USA) с целью решения гемодинамических задач. Кровь моделировалась как неньютоновская жидкость Каро (параметры модели  $\eta_{\infty} = 0,0035$  Па·с,  $\eta_0 = 0,0056$  Па·с,  $\lambda = 3,313$  с,  $n = 0,3568$  (Siebert, 2009)). При проведении расчётов использовался метод конечных элементов. С помощью распространённых гемодинамических показателей (пристеночные касательные напряжения, осредненные за сердечный цикл пристеночные касательные напряжения, индекс колебаний касательных напряжений, относительное время пребывания) была проанализирована разница при различных вариантах установки шунтов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании участвовали 35 детей, которым требовалась хирургическая коррекция ВПС с помощью МБТ-шунта. Медиана возраста этих детей была на момент операции 10 (3,5–30) дней, медиана массы тела – 3,0 (2,8–3,54) кг. Паллиативное шунтирование выполнено для бивентрикулярных сердец (тетралогия Фалло / правый желудочек с

двойным выходом / атрезия легочной артерии – дефект межжелудочковой перегородки I и II типов) у 28 пациентов, с унiventрикулярной гемодинамикой – у 7. Пациенты с гипопластическим синдромом левых отделов сердца были исключены из исследования.

Лабораторные данные следующие: медиана уровня гемоглобина до оперативного вмешательства составила 148 г/л (130–159), лейкоцитов  $11 \cdot 10^9$ /л (8,1–14,9). Значение медианы сатурации до операции составило 78 % (71–81,5).

В целом искусственное кровообращение использовалось у 21 пациента (60 %). Размер используемого шунта составлял 3,0 мм у 8 (21,6 %), 3,5 мм у 23 (62,2 %), 4,0 мм у 4 (10,8 %). Среднее соотношение «размер / масса шунта» составило 1,11 (1,0–1,21). Медиана размера шунта составляла 3,5 мм (3,5–3,5), а медиана размера шунта на 1 кг массы тела – 1,11 (1,0–1,21) мм/кг. Увеличение размера шунта потребовалось 4 пациентам (11,4 %) из 35.

У 15 (43 %) из 35 пациентов ОАП оставался открытым после операции МБТШ и закрывался на 5–6-е сутки без отрицательных последствий для гемодинамики. Значение медианы сатурации после операции составило 87 (82–91).

В 17 % (6 детям из 35) случаев пациента оставляли в палате реанимации с хирургическим диастазом грудины. Отсроченное ушивание проводилось на 2-е сутки после операции (лишь у одного пациента из 6 удалось закрыть на 4-е сутки).

После оперативного вмешательства медиана дозы аспирина у этих пациентов составляла 20 мг/сут (10–30) (табл. 2, 3).

В нашем исследовании единственным достоверным прогностически неблагоприятным фактором риска смерти стали большие величины отношения «размер шунта к массе тела» ( $p = 0,023$ ) был значимым фактором риска смертности.

Таблица 2

**Данные о процедуре шунтирования**

Переменная		Количество
Размер шунта (мм), абс. (%)	3	8 (23)
	3,5	22 (63)
	4	5 (14)
Приток, абс. (%)	Брахиоцефальный ствол	27 (78)
	Восходящая аорта	7 (20)
	Подключичная артерия	1 (2)
Отток, абс. (%)	Правая лёгочная артерия	23 (66)
	Лёгочная бифуркация	9 (26)
	Лёгочный ствол	3 (8)
Аппарат ИК, абс. (%)		21 (60)
Абсолютный размер шунта, мм		3,5 (3,5–3,5)
Средний размер шунта/вес тела, мм/кг		1,11 (1,0–1,21)

Таблица 3

**Сравнительная характеристика пациентов**

Показатель	Живые, <i>n</i> = 32	Умершие, <i>n</i> = 3	<i>p</i>
	<i>Me</i> (Q1–Q3)	<i>Me</i> (Q1–Q3)	
Возраст на момент операции, сут	9,5 (3–30)	9 (6,5–12,5)	0,595
Рост, см	51,5 (47,8–54)	46 (45,5–52,5)	0,516
Масса на момент операции, кг	3,18 (2,9–3,58)	2,7 (2,62–2,85)	0,156
Диаметр шунта, мм	3,5 (3,38–3,5)	3,5 (3,5–3,75)	0,230
Шунт, мм/кг	1,1 (0,992–1,18)	1,38 (1,35–1,42)	<b>0,023</b>
Сатурация до операции, %	78 (71,5–80,8)	80 (75–82)	0,767
Сатурация через 48 ч после операции, %	86 (82–91)	87 (87–92)	0,329
Гемоглобин до операции, г/л	148 (130–157)	152 (140–172)	0,498
Лейкоциты до операции, 10 <sup>9</sup> /л	11,1 (8,23–15,0)	8,3 (6,65–9,75)	0,195
Время искусственного кровообращения, мин	31 (0–55,5)	48 (43,5–51,5)	0,361
Кровотечение первые 6 ч, мл	28,5 (17,8–48,3)	49 (33,5–49,5)	0,575
Гемоглобин через 6 ч, г/л	137 (122–154)	131 (124–143)	0,883
Кровь перелита, мл	363 (180–626)	586 (445–646)	0,458
Плазма перелито, мл	240 (0–313)	230 (205–345)	0,811
Кровотечение за сутки, мл/кг	63,5 (45,3–110)	59 (56–74,5)	0,837
гепарин в первые сутки, ед/кг/ч	10 (10–17)	10 (7,5–10)	0,216
Время ОРИТ, сут	8 (6–12,3)	3 (2,5–11)	0,274

Трое (8,6 %) из 35 пациентов умерли через 3 (2,5–11,0) дня от проявлений кардиореспираторной декомпенсации. У этих пациентов установлены следующие ВПС: один – атрезия легочной артерии 2-го типа с дефектом межжелудочковой перегородки,

второй – простая форма транспозиции магистральных сосудов с дефектом межпредсердной перегородки, дефектом межжелудочковой перегородки, подклапанным стенозом легочной артерии и третий – с выраженным стенозом клапана легочной

артерии и дефектом межжелудочковой перегородки.

При анализе факторов, которые могли повлиять на летальный исход, были выявлены достоверно большие значения отношения «шунт (мм) / масса (кг)», которое составило – 1,38 мм/кг ( $p = 0,023$ ). По остальным показателям достоверные отличия не выявлены.

**Результаты оценки гидродинамического моделирования.** Соотношение кровотоков малого и большого круга кровообращения ( $pQ/Qs$ ) для шунтов 3,5–4 мм составило 1,3/1,6 и 1,4/2,1 соответственно. Поток по легочным артериям был несимметричен при всех типах шунтов (на 20 %), а при центральной конфигурации – более 40 % в пользу левой легочной артерии. Правое расположение шунта оказалось наиболее благоприятным с точки зрения распределения кровотока. Центральная позиция шунта значительно снижает давление перфузии коронарных артерий, даже боковая позиция большего диаметра шунта не так снижает коронарную перфузию, как центральный шунт меньшего диаметра.

**Минусы исследования.** Нам не была доступна информация об общем числе пациентов с ВПС, находящихся в Пермском крае, которым показано проведение МБТ-шунтирования. Поэтому результаты проведенного исследования не содержат полной информации. Нам не были предоставлены достоверные данные о состоянии пациентов в отдаленном периоде, поэтому не проведен анализ отдаленных результатов МБТ-шунтирования с использованием математического моделирования. Точность информации о пациенте могла снижаться вследствие возможных ошибок при переносе данных.

Операции по установке шунта Блэлка – Тауссига (МБТШ) являются актуальной проблемой у новорожденных из-за непредсказуемых краткосрочных и долгосрочных результатов. Оптимальный размер шунта,

место его расположения являются важными факторами, влияющими на успех операции по шунтированию, поскольку идеальный шунт должен обеспечить равномерный рост легочных артерий, не вызывая искажения. Чрезмерная величина шунта приводит к значительному диастолическому стоку в краткосрочной перспективе и повышенному легочному сосудистому сопротивлению или нарушению работы желудочков и атриовентрикулярных клапанов в долгосрочной перспективе [1, 11–14].

Исследователями продолжает обсуждаться вопрос, касающийся функционирования открытого артериального протока (ОАП) как дополнительного источника кровоснабжения малого круга кровообращения. С одной стороны, ряд авторов отмечает необходимость его лигирования при проведении операции МБТШ [15, 16], с другой – указываются данные, которые обосновывают необходимость функционирования ОАП в раннем послеоперационном периоде [17]. Однако большая часть исследователей соглашается с тем, что лигирование протока показано при наличии анастомоза диаметром более 3,5 мм и возрасте ребенка старше месяца, а оставлять функционирующий артериальный проток следует при малых диаметрах анастомоза (3–3,5 мм) и возрасте до месяца, мы старались придерживаться такой же тактики.

В литературе представлены данные о том, что масса тела является значительным фактором после МБТШ, даже при улучшении анестезии, хирургических методах, шунтировании и послеоперационном лечении. В наше исследование не входили пациенты с массой менее 2,5 кг, возможно, поэтому мы не нашли подтверждения этому факту [8, 11, 12].

Ряд исследователей отмечает, что превышение гемоглобина выше 180 г/л и гематокрита выше 45 % является фактором риска тромбоза шунта в раннем послеоперационном периоде [13, 18, 19]. В проведенном ис-

следовании не встречались показатели, близкие к описанным, но и не было отмечено какого-то решающего значения в уровне гемоглобина, количестве кровопотери по дренажам, наличия гемо- и плазматрансфузии в раннем послеоперационном периоде и влияния на функционирование шунта.

Учитывая важность индивидуального подбора модифицированного шунта Блэлока – Тауссига для обеспечения эффективного функционирования, основной научный поиск направлен на создание методик с учетом количественных оценок на основе применения биомеханики и математического моделирования, которые бы смогли учесть все гемодинамические особенности конкретного пациента.

В настоящее время методы вычислительной гидродинамики широко используются в клинической практике [16, 20–22].

Математическое моделирование и методы биомеханики позволяют оценить прогностические данные, которые не могут обеспечить современные методы визуализации. В настоящее время информационные технологии, разработка эффективных вычислительных алгоритмов позволяют реконструировать реалистичные и точные трехмерные модели, в которых учитывается уровень артериального давления, детальная анатомия, механизмы обратной связи в системе кровообращения и деформации стенки сосуда. У клинициста появляется возможность неинвазивно определить временные и пространственные изменяющиеся гемодинамические параметры, которые не могут быть изучены путем визуализации или клинических измерений [23].

У хирургов появляется возможность помимо имеющейся клинической информации о пациенте получить персонифицированную карту пациента с полным и детальным расчетом всех позиций шунтов, расчета всех возможных диаметров шунтов, что, безусловно, поможет сделать правильный интраопераци-

онный выбор и снизить летальность и осложнения в данной группе больных. Возможно, это один из новых подходов к самой хирургии.

## Выводы

Процедура МБТШ продолжает оставаться процедурой высокого риска, что связано со значительной заболеваемостью и смертностью в раннем послеоперационном периоде. Математическое моделирование системы «аорта – шунт – легочная артерия» перед операцией позволит выбрать оптимальный диаметр шунта и место его имплантации и станет одним из шагов к персонифицированной хирургии врожденных пороков сердца в будущем.

## Библиографический список

1. McKenzie E.D., Khan M.S., Samayoa A.X. et al. The Blalock-Taussig shunt revisited: a contemporary experience. *J Am CollSurg* 2013; 216 (4): 699–704.
2. Williams J.A., Bansal A.K., Kim B.J. et al. Two thousand Blalock-Taussig shunts: a six-decade experience. *Ann Thorac Surg* 2007; 84: 2070–2075.
3. Moulton A.L., Brenner J.I., Ringel R. et al. Classic versus modified Blalock-Taussig shunts in neonates and infants. *Circulation* 1985; 72: П35–44.
4. Blalock a, taussig hb. The surgical treatment of malformations of the heart: in which there is pulmonary stenosis or pulmonary atresia. *jama* 1945; 128 (3): 189–202.
5. de Leval M.R., McKay R., Jones M., Stark J., Macartney F.J. Modified Blalock-Taussig shunt. Use of subclavian artery orifice as flow regulator in prosthetic systemic-pulmonary artery shunts. *Thorac Cardiovasc Surg* 1981; 81 (1): 112–119.
6. Gold J.P., Violaris K., Engle M.A. et al. A five-year clinical experience with 112 Blalock-Taussig shunts. *J CardSurg* 1993; 8: 9–17.



7. Verena Dirks, René Prêtre, Walter Knirsch, Emanuela R. Valsangiacomo Buechel, Burkhardt Seifert, Martin Schweiger, Michael Hübler and Hitendu Dave. Modified Blalock Taussig shunt: a not-so-simple palliative procedure. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery* 2013; 44: 1096–1102.
8. Curzon C.L., Milford-Beland S., Li J.S. et al. Cardiac surgery in infants with low birth weight is associated with increased mortality: analysis of the Society Of Thoracic Surgeons Congenital Heart Database. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2008; 135: 546–555.
9. Alsoufi B., Gillespie S., Mori M., Clabby M., Kanter K., Kogon B. Factors affecting death and progression towards next stage following modified Blalock-Taussig shunt in neonates. *Eur J Cardiothorac Surg* 2016; 50: 169–177.
10. European Association for Cardiothoracic Surgery (EACTS) congenital database, available at: <http://www.eactscongenitaldb.org/db/public-reports.py?fnrc42&dbname=database>.
11. Orlando Petrucci, O'Brien S.M., Jacobs M.L., Jacobs J.P., Manning P.B., Eghtesady P. Risk factors for mortality and morbidity after the neonatal Blalock-Taussig shunt procedure. *Ann Thorac Surg* 2011; 92 (2): 642–652.
12. Myers J.W., Ghanayem N.S., Cao Y. et al. Outcomes of systemic to pulmonary artery shunts in patients weighing less than 3 kg: analysis of shunt type, size, and surgical approach. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2014; 147: 672–677.
13. Gedicke M., Morgan G., Parry A., Martin R., Tulloh R. Risk factors for acute shunt blockage in children after modified Blalock-Taussig shunt operations. *Heart Vessels* 2010; 25 (5): 405–409.
14. Shibata M., Itatani K., Oka N., Yoshii T., Nakamura Y., Kitamura T., Horai T., Miyaji K. Optimal Graft Size of Modified Blalock-Taussig Shunt for Biventricular Circulation in Neonates and Small Infants. *Int Heart J* 2015; 56 (5): 533–536.
15. Michio Yokota M.D. Ryusuke Muraoka M.D. Minoru Aoshima M.D. Shinichi Nomoto M.D. Yoshishada Shiraishi et al. Modified Blalock-Taussig shunt following long-term administration of prostaglandin E1 for ductus-dependent neonates with cyanotic congenital heart disease. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* 1985; 90 (3): 399–403.
16. Neichuan Zhanga, Haiyun Yuanb, Xiangyu Chen, Jiawei Liu, Chengbin Zhou, Meiping Huang, Qifei Jian, Jian Zhuang Hemodynamic of the patent ductus arteriosus in neonates with modified Blalock-Taussig shunts *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 2020; 186: 105223
17. Zaborec M., Hrubsova Z., Skrak P., Poruban R., Nosal M., Kovacikova L. A comparison of Blalock-Taussig shunts with and without closure of the ductus arteriosus in neonates with pulmonary atresia. *Ann Thorac Surg* 2011; 92 (2): 653–658.
18. Saboo T.K., Chauban S., Sabu M., Bisoi A., Kiran U. Effects of hemodilution on outcome after modified Blalock-Taussig shunt operation in children with cyanotic congenital heart disease. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2007; 21: 179–183.
19. Ruttman T.G. Haemodilution enhances coagulation. *Br J Anaesth* 2002; 88 (4): 470–472.
20. Marsden A.L. Simulation based planning of surgical interventions in pediatric cardiology. *Phys Fluids* (1994) 2013; 25 (10): 101303.
21. Keshmiri, Amir; Andrews, Kirstie. Vascular flow modelling using computational fluid dynamics. *Handbook of Vascular Biology Techniques*. Springer Nature 2015; 343–361.
22. Malota Z., Nawrat Z., Kostka P., Mizerski J., Nowinski K., Waniewski J. Physical and computer modelling of blood flow in a systemic-to-pulmonary shunt. *Int J Artif Organs* 2004; 27 (11): 990–999.
23. DeCampli W.M., Ricardo Argueta-Morales I., Divo E., Kassab A.J. Computational fluid dynamics in congenital heart disease. *Cardiol. Young* 2012; 22 (6): 800–808.

## REFERENCES

1. McKenzie E.D., Khan M.S., Samayoa A.X. et al. The Blalock-Taussig shunt revisited: a contemporary experience. *J Am CollSurg* 2013; 216 (4): 699-704.
2. Williams J.A., Bansal A.K., Kim B.J. et al. Two thousand Blalock-Taussig shunts: a six-decade experience. *Ann Thorac Surg* 2007; 84: 2070-2075.
3. Moulton A.L., Brenner J.I., Ringel R. et al. Classic versus modified Blalock-Taussig shunts in neonates and infants. *Circulation* 1985; 72: II35-44.
4. Blalock a, taussig hb. The surgical treatment of malformations of the heart: in which there is pulmonary stenosis or pulmonary atresia. *jama* 1945; 128 (3): 189-202.
5. de Leval M.R., McKay R., Jones M., Stark J., Macartney F.J.J Modified Blalock-Taussig shunt. Use of subclavian artery orifice as flow regulator in prosthetic systemic-pulmonary artery shunts. *Thorac Cardiovasc Surg* 1981; 81 (1): 112-119.
6. Gold J.P., Violaris K., Engle M.A. et al. A five-year clinical experience with 112 Blalock-Taussig shunts. *J CardSurg* 1993; 8: 9-17.
7. Verena Dirks, René Prêtre, Walter Knirsch, Emanuela R. Valsangiacomo Buechel, Burkhardt Seifert, Martin Schweiger, Michael Hübler and Hitendu Dave. Modified Blalock Taussig shunt: a not-so-simple palliative procedure. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery* 2013; 44: 1096-1102.
8. Curzon C.L., Milford-Beland S., Li J.S. et al. Cardiac surgery in infants with low birth weight is associated with increased mortality: analysis of the Society Of Thoracic Surgeons Congenital Heart Database. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2008; 135: 546-555.
9. Alsoufi B., Gillespie S., Mori M., Clabby M., Kanter K., Kogon B. Factors affecting death and progression towards next stage following modified Blalock-Taussig shunt in neonates. *Eur J Cardiothorac Surg* 2016; 50: 169-177.
10. European Association for Cardiothoracic Surgery (EACTS) congenital database, available at: <http://www.eactscongenitaldb.org/db/public-reports.py?fnrcr42&dbname=database>.
11. Orlando Petrucci, O'Brien S.M., Jacobs M.L., Jacobs J.P., Manning P.B., Eghtesady P. Risk factors for mortality and morbidity after the neonatal Blalock-Taussig shunt procedure. *Ann Thorac Surg* 2011; 92 (2): 642-652.
12. Myers J.W., Ghanayem N.S., Cao Y. et al. Outcomes of systemic to pulmonary artery shunts in patients weighing less than 3 kg: analysis of shunt type, size, and surgical approach. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2014; 147: 672-677.
13. Gedicke M., Morgan G., Parry A., Martin R., Tulloh R. Risk factors for acute shunt blockage in children after modified Blalock-Taussig shunt operations. *Heart Vessels* 2010; 25 (5): 405-409.
14. Shibata M., Itatani K., Oka N., Yoshii T., Nakamura Y., Kitamura T., Horai T., Miyaji K. Optimal Graft Size of Modified Blalock-Taussig Shunt for Biventricular Circulation in Neonates and Small Infants. *Int Heart J* 2015; 56 (5): 533-536.
15. Michio Yokota M.D. Ryusuke Muraoka M.D. Minoru Aoshima M.D. Shinichi Nomoto M.D. Yoshishada Shiraishi et al. Modified Blalock-Taussig shunt following long-term administration of prostaglandin E1 for ductus-dependent neonates with cyanotic congenital heart disease. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery* 1985; 90 (3): 399-403.
16. Neichuan Zhanga, Haiyun Yuanb, Xiangyu Chen, Jiawei Liu, Chengbin Zhou, Meiping Huang, Qifei Jian, Jian Zhuang Hemodynamic of the patent ductus arteriosus in neonates with modified Blalock-Taussig shunts *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 2020; 186: 105223
17. Zaborec M., Hrubsova Z., Skrak P., Poruban R., Nosal M., Kovacikova L. A comparison of Blalock-Taussig shunts with and without

closure of the ductus arteriosus in neonates with pulmonary atresia. *Ann Thorac Surg* 2011; 92 (2): 653-658.

18. Saboo T.K., Chauban S., Sabu M., Bisoi A., Kiran U. Effects of hemodilution on outcome after modified Blalock-Taussig shunt operation in children with cyanotic congenital heart disease. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2007; 21: 179-183.

19. Ruttmann T.G. Haemodilution enhances coagulation. *Br J Anaesth* 2002; 88 (4): 470-472.

20. Marsden A.L. Simulation based planning of surgical interventions in pediatric cardiology. *Phys Fluids* (1994) 2013; 25 (10): 101303.

21. Kesbmiri, Amir; Andrews, Kirstie. Vascular flow modelling using computational fluid dynamics. *Handbook of Vascular Biology Techniques. Springer Nature* 2015; 343-361.

22. Malota Z., Nawrat Z., Kostka P., Mizerski J., Nowinski K., Waniewski J. Physical and computer modelling of blood flow in a systemic-to-pulmonary shunt. *Int J Artif Organs* 2004; 27 (11): 990-999.

23. DeCampi W.M., Ricardo Argueta-Morales I., Divo E., Kassab A.J. Computational fluid dynamics in congenital heart disease. *Cardiol. Young* 2012; 22 (6): 800-808.

**Финансирование. Благодарность.**

А.А. Породииков и А.Г. Кучумов благодарят финансовую поддержку гранта РФФИ р\_НОЦ\_Пермский край № 20-41-596005.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 11.10.2021

Одобрена: 28.12.2021

Принята к публикации: 01.02.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Перспективы математического моделирования для оптимизации межсистемного шунтирования при врожденных пороках сердца у детей / Ю.С. Синельников, В.Б. Арутюнян, А.А. Породииков, А.Н. Биянов, Н.С. Поспелова, А.Г. Кучумов, В.С. Туктамышев // Пермский медицинский журнал. – 2022. – Т. 39, № 1. – С. 74–84. DOI: 10.17816/pmj39174–84

Please cite this article in English as: Sinelnikov Yu.S., Arutyunyan V.B., Porodikov A.A., Biyanov A.N., Pospelova N.S., Kuchumov A.G., Tuktamyshev V.S. Prospects of mathematical modelling for optimization of intersystem bypass grafting in congenital heart diseases among children. *Perm Medical Journal*, 2022, vol. 39, no. 1, pp. 74-84. DOI: 10.17816/pmj39174–84